

Implementasi Metode Deteksi Hujan Es Berbasis Data Radar Cuaca Menggunakan Algoritma *Severe Hail Index* (SHI)

Abdullah Ali^{1,*}, Umi Sa'adah²

¹Bidang Pengelolaan Citra Inderaja BMKG, Jakarta, Indonesia

²Stasiun Meteorologi Soekarno-Hatta BMKG, Tangerang, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 25 Maret 2022

Direvisi: 27 Juni 2022

Diterima: 5 Juli 2022

Kata kunci:

Hail Detection Algorithm

Radar Cuaca Doppler

Severe Hail Index

Keywords:

Hail Detection Algorithm

Weather Radar Doppler

Severe Hail Index

Penulis Korespondensi:

Abdullah Ali

Email: abdullah.ali@bmkgo.id

ABSTRAK

Metode *Severe Hail Index* (SHI) merupakan metode pendeteksian hujan es yang paling komprehensif dengan output berupa indeks probabilitas hujan es (pada setiap ukuran) dalam satuan $Jm^{-1}s^{-1}$, probabilitas severe hail dalam satuan %, dan prakiraan ukuran maksimum batu es yang mencapai permukaan dalam satuan milimeter. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan metode SHI sebagai detektor dan prediktor kejadian hujan es di Indonesia. Dari 13 kejadian hujan es diperoleh nilai maksimum indeks probabilitas hujan es untuk setiap ukuran sebesar $269 Jm^{-1}s^{-1}$ dan nilai minimum $0 Jm^{-1}s^{-1}$, nilai maksimum indeks probabilitas severe hail sebesar 64.4 % dan nilai minimum 0%, sedangkan nilai maksimum prakiraan ukuran maksimum batu es mencapai 63.76 mm dan minimum 8.25 mm. Simulasi dilakukan dengan membandingkan nilai SHI dengan WT yang kemudian digunakan untuk menentukan nilai POD (*Possibility of Detection*), CSI (*Critical Success Index*), dan FAR (*False Alarm Ratio*). POD pada simulasi ini diperoleh nilai 0.307 dan 0.230, FAR 0.0, dan CSI 0.307. FAR bernilai 0.0 menunjukkan metode ini mempunyai tingkat kesalahan yang sangat kecil untuk mendeteksi atau memperdiksi adanya hujan es namun nilai POD masih tergolong rendah, sehingga metode ini juga cukup sulit untuk mendeteksi eksistensi hail di lapangan. Hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa perlunya modifikasi pada perumusan WT untuk meningkatkan performa metode SHI dalam mendeteksi dan memprediksi kejadian hujan es.

The Severe Hail Index (SHI) method is the most comprehensive method of detecting hail with outputs in the form of an index of the probability of hail (at each size) in units of $Jm^{-1}s^{-1}$, the probability of severe hail in units of %, and an estimate of the maximum size of hail that can occur. reach the surface in millimeters. This study aims to implement the SHI method as a detector and predictor of hail events in Indonesia. Of the 13 hail events, the maximum value of the hail probability index for each size is $269 Jm^{-1}s^{-1}$ and the minimum value is $0 Jm^{-1}s^{-1}$, the maximum value of the severe hail probability index is 64.4% and the minimum value is 0%, while the maximum value the estimated maximum size of ice cubes is 63.76 mm and a minimum of 8.25 mm. The simulation is done by comparing the SHI value with WT which is then used to determine the POD (Possibility of Detection), CSI (Critical Success Index) and FAR (False Alarm Ratio) values. POD in this simulation obtained values of 0.307 and 0.230, FAR 0.0, and CSI 0.307. FAR value of 0.0 indicates this method has a very small error rate to detect or predict the presence of hail but the POD value is still relatively low, so this method is also quite difficult to detect the existence of results in the field. The simulation results indicate that it is necessary to modify the WT formulation to improve the performance of the SHI method in detecting and predicting hail events.

Copyright © 2022 Author(s). All rights reserved



I. PENDAHULUAN

Hujan es merupakan bentuk presipitasi berupa bola, potongan, maupun serpihan es yang diakibatkan oleh sistem awan konvektif, dan batuan es yang mencapai permukaan disebut hailstone (Fadholi, 2012; Ali, 2014). Sistem perawanan konvektif tersebut mengandung campuran antara partikel kelewat dingin dan butiran-butiran es. Arus udara vertikal yang kuat pada sistem awan konvektif mengaduk partikel kelewat dingin hingga mencapai suhu -40°C dan tumbuh menjadi partikel es (Tjasyono, 2004; Tjasyono, 2007). Partikel es yang teraduk oleh arus vertikal dapat bertambah besar melalui proses kolisi dan koalesensi (Tjasyono, 2007).

Pada umumnya pendeteksian hujan es dilakukan menggunakan radar cuaca dimana parameter reflektivitas digunakan sebagai salah satu indikator adanya sel konvektif penyebab hujan es (Ali et al., 2022). Nilai reflektivitas diatas 40 dBZ pada umumnya menjadi indikasi adanya awan Cumulonimbus yang sedang berkembang dengan baik (Ali et al., 2019; Ali dan Putra, 2015). Terdapat beberapa metode deteksi hujan es atau HDA (*Hail Detection Algorithm*) yang telah dikembangkan, salah satunya algoritma *Vertically Integrated Liquid Water* (VIL). Algoritma tersebut merupakan konjungsi dari algoritma *Storm Cell Identification and Tracking* (SCIT) dan menunjukkan hasil yang signifikan dalam beberapa kejadian hujan es (Johnson et al., 1998). Algoritma SCIT mendeteksi setiap sel awan pada komponen sel badai 2D dari hasil quasi-horizontal crosssection pada masing-masing elevasi. Ketinggian dan nilai reflektivitas maksimum dari masing-masing komponen tersebut digunakan untuk membuat profil vertikal reflektivitas yang kemudian digunakan pada algoritma VIL dalam menentukan potensi hujan es pada tiap-tiap HDA. Dalam perkembangannya, HDA ini dibagi menjadi dua hasil output, yaitu pendeteksian hujan es pada ukuran hailstone sembarang, dan pendeteksian hujan es yang sangat kuat (*severe hail*) dimana radius hailstone lebih dari 3cm (Witt et al., 1998).

Pendeteksian *severe hail* pada metode SHI yang pendekatannya serupa dengan algoritma VIL (yaitu integrasi vertikal dari nilai reflektivitas) dilakukan dengan melakukan improvisasi pada metode yang dibuat oleh Witt et al., (1998). Perubahan pertama dilakukan dengan mengganti grid-based algorithm menjadi cell-based algorithm menggunakan output dari metode SCIT. Perubahan kedua dilakukan pada relasi antara nilai reflektivitas dengan kejadian hujan es, yaitu merubah relasi nilai reflektivitas dengan liquid water content menjadi relasi nilai reflektivitas dengan nilai flux energi kinetik hujan es (\dot{E}) sebagai fungsi dari reflektivitas (Wadvogel et al. 1978a; Wadvogel et al, 1978b; Federer et al, 1986). Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan metode SHI pada kejadian hujan es di Indonesia dengan melihat tiga indeks output metode SHI yaitu *Severe Hail Index* (SHI) sebagai indikator dan prediktor adanya hujan es, *Warning Threshold* (WT) sebagai batas ambang nilai SHI, *Possibility of Severe Hail* (POSH) sebagai kemungkinan terjadinya hujan es hebat (*severe hail*), dan *Maximum Expected Hail Size* (MEHS) sebagai prediktor ukuran.

II. METODE PENELITIAN

Lokasi yang digunakan pada penelitian ini adalah hujan es yang terjadi di daerah Jakarta, Bogor, Depok, Tangerang, Bekasi, dan Bandung dimana area hasil pengamatan radar cuaca BMKG yang di pasang di Stasiun Geofisika Tangerang masih representatif sebagai nilai input pada metode SHI. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dasar volumetrik radar cuaca Doppler berupa data reflektivitas dan data pengamatan udara atas dari alat radiosonde dari Stasiun Meteorologi Cengkareng BMKG. Hujan es yang diteliti merupakan kejadian hujan es yang terjadi di Jabodetabek dan Bandung pada tahun 2015.

Simulasi metode SHI pada kejadian hujan es di Indonesia dilakukan dengan mencari nilai SHI, WT, POSH, dan MEHS pada tiap kejadian hujan es pada Tabel.1 kemudian diaplikasikan pada data perbandingan. Nilai SHI dihitung dalam satuan $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ dimana bergantung pada fluks energi kinetik hujan es, reflektivitas, serta ketinggian profil temperature 0°C dan -20°C . SHI dirumuskan berdasarkan Persamaan 1.

$$SHI = 0,1 \int_{(H_0)}^{(H_T)} W_T(H) \dot{E} dH \quad (1)$$

dengan H_0 adalah freezing level dalam meter, H_T adalah tinggi puncak awan dalam meter, $W_T(H)$ adalah temperature-based weighting function, dan \dot{E} adalah fluks energi kinetik hujan es. Nilai $W_T(H)$ dirumuskan berdasarkan Persamaan 2.

$$W_T(H) = \begin{cases} 0; & \text{untuk } H \leq H_0 \\ \frac{H - H_0}{H_{m20} - H_0}; & \text{untuk } H_0 \leq H \leq H_{m20} \\ 1; & \text{untuk } H \geq H_{m20} \end{cases} \quad (2)$$

dimana H adalah ketinggian inti sel awan dilihat dari ketinggian maksimum profil reflektivitas 45 dBZ, dan H_{m20} adalah ketinggian suhu -20°C . Ketinggian profil reflektivitas 45 dBZ sebagai ketinggian inti awan (H) dan ketinggian puncak awan (H_T) ditentukan berdasarkan citra cross section dari produk CMAX(Z) maupun melalui diagram aerologi. Pemilihan arah *cross section* untuk menentukan nilai H didasarkan pada lokasi nilai reflektivitas maksimum, sedangkan arah *cross section* untuk menentukan ketinggian puncak awan harus mempertimbangkan lokasi *anvil* dari sel awan. Ketinggian temperatur -20°C (H_{m20}) dan freezing level (H_0) ditentukan berdasarkan analisis radiosinde menggunakan aplikasi Raob 5.7. Nilai fluks energi kinetik hujan es (\dot{E}) dirumuskan dengan Persamaan 3 dan Persamaan 4

$$\dot{E} = 5 \times 10^{(-6)} \times 10^{0,084Z} W(Z) \quad (3)$$

$$W(Z) = \begin{cases} 0; & \text{untuk } Z \leq Z_L \\ \frac{Z - Z_L}{Z_U - Z_L}; & \text{untuk } Z_L < Z < Z_U \\ 1; & \text{untuk } Z \geq Z_U \end{cases} \quad (4)$$

dimana Z adalah reflektivitas maksimum, Z_L adalah batas bawah reflektivitas (40 dBz) dan Z_U adalah batas atas reflektivitas (50 dBZ). Nilai reflektivitas maksimum ditentukan melalui analisis produk CMAX(Z). Nilai SHI kemudian dibandingkan dengan nilai WT sebagai batas ambang prediktor kejadian hujan es yang merupakan fungsi dari ketinggian freezing level. Nilai WT dan SHI kemudian digunakan untuk menghitung nilai POSH dan nilai MEHS. WT, POSH, dan MEHS dirumuskan dengan Persamaan 5, Persamaan 6, dan Persamaan 7.

$$WT = 57,5H_0 - 121 \quad (5)$$

$$POSH = 29 \ln \left(\frac{SHI}{WT} \right) + 50 \quad (6)$$

$$MEHS = 2,54SHI^{0,5} \quad (7)$$

Indikator keberhasilan metode dihitung melalui nilai CSI, POD, dan FAR. Metode dianggap baik untuk digunakan sebagai detektor dan prediktor hujan es di Indonesia saat nilai POD lebih besar dari FAR.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penentuan nilai ketinggian freezing level, ketinggian temperatur -20°C , ketinggian puncak awan berdasarkan radar cuaca dan radiosonde, serta nilai reflektivitas maksimum terdapat pada Tabel 1. Tinggi puncak awan pada radiosonde ditentukan melalui hasil perhitungan EL (*equilibrium level*). Hasil perhitungan SHI, WT, POSH, dan MEHS berdasarkan nilai-nilai pada Tabel 1 terdapat pada Tabel 2. Nilai dBZ maksimum yang terdeteksi pada seluruh studi kasus lebih dari 45 dBZ, hasil ini serupa dengan penelitian Tuovinen et al (2020) di Finlandia dan Terdapat perbedaan hasil perhitungan SHI antara tinggi puncak awan yang ditentukan melalui pengamatan radar cuaca SHI(R) dengan tinggi puncak awan melalui perhitungan diagram termodinamika SHI(T), hal tersebut terjadi karena ketinggian puncak awan dari pengamatan radiosonde hanya berupa estimasi, sedangkan tinggi awan dari radar cuaca merupakan hasil observasi (Ali dan Putra, 2015).

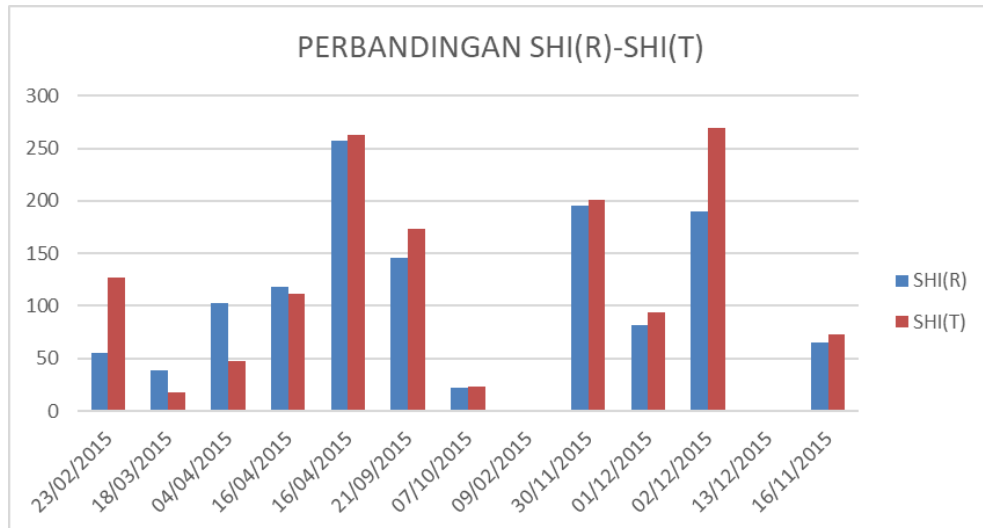
Tabel 1. Hasil penentuan parameter-parameter dalam perhitungan SHI

Studi kasus	Ketinggian Ho (m)	Ketinggian H20 (m)	Ketinggian HT (m)	Ketinggian HT _R (m)	Ketinggian H (m)	Zmax (dBZ)
1	4918	8162	12896	8400	7400	55
2	4955	8285	8915	13700	6000	53
3	4700	8161	8565	13100	7400	53.5
4	4885	8186	12555	13000	7200	55
5	4885	8186	12374	12200	8000	58
6	4713	8311	12884	11600	7200	57
7	5170	8164	13602	13500	5600	54.5
8	4776	8253	10653	4700	4900	48.5
9	5095	8295	15416	15100	9100	53.5
10	4909	8659	14569	13300	6100	57
11	5030	8334	14464	11700	8100	57
12	5050	8513	14747	11600	5000	55
13	5037	8400	13114	12300	6800	54

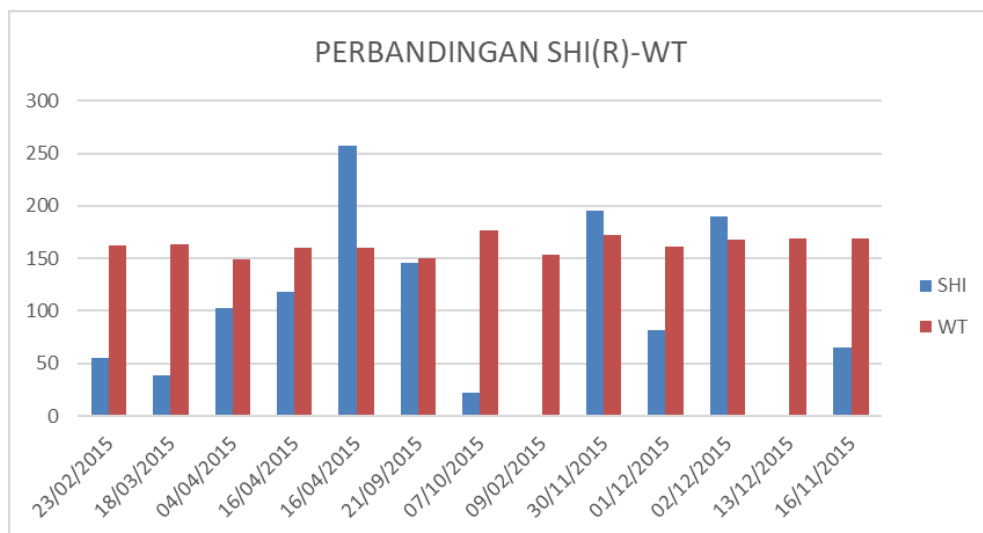
Tabel 2. Hasil perhitungan SHI, WT, POSH, dan MEHS

Studi kasus	SHI _R (Jm^{-1}s^1)	SHI (Jm^{-1}s^1)	WT (Jm^{-1}s^1)	POSH (%)	POSH _R (%)	MEHS (mm)
1	55.5	127.2	161.7	43.03	18.9	28.6
2	38.8	17.5	163.9	0	8.2	10.6
3	102.1	47.0	149.25	16.5	39.0	17.4
4	118.6	112.1	159.8	39.7	41.3	26.8
5	257.0	263.1	159.8	64.4	63.7	41.2
6	146.0	173.3	149.9	54.1	49.2	33.4
7	22.6	22.9	176.2	0	0	12.1
8	0	1.0	153.6	0	0	2.6
9	195.2	201.4	171.9	54.5	53.6	36.0
10	81.7	94.1	161.2	34.3	30.3	24.6
11	190.1	269.0	168.2	63.6	53.5	41.6
12	0	0	169.3	0	0	0
13	65.4	72.7	168.6	25.6	22.5	21.6

Hasil perbandingan antara SHI(R) dengan WT terdapat pada Gambar 2. Dari 13 kejadian hujan es, 3 kejadian hujan es melebihi nilai WT dan dikategorikan sebagai *hit* (H), 10 kejadian hujan es kurang dari WT dan dikategorikan sebagai *miss* (M), sedangkan data pembanding menunjukkan tidak ada kategori *false* (F) dimana hasil perhitungan SHI(R) maupun SHI(T) tidak ada yang melebihi nilai WT. Nilai SHI(T) menghasilkan nilai POD 0.307, FAR 0.0, dan CSI 0.307, sedangkan nilai SHI(R) menghasilkan nilai POD 0.230, FAR 0.0, dan CSI 0.230. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian Murrilo et al (2019), hasil POD pada penelitian ini memiliki tingkat akurasi yang lebih rendah, hanya berkisar pada rentang 20-30 %, sedangkan pada penelitian Murrilo et al (2019) dapat mencapai 60-80%. Namun hasil penerapan algoritma SHI pada penelitian ini tidak menghasilkan *false alarm*.



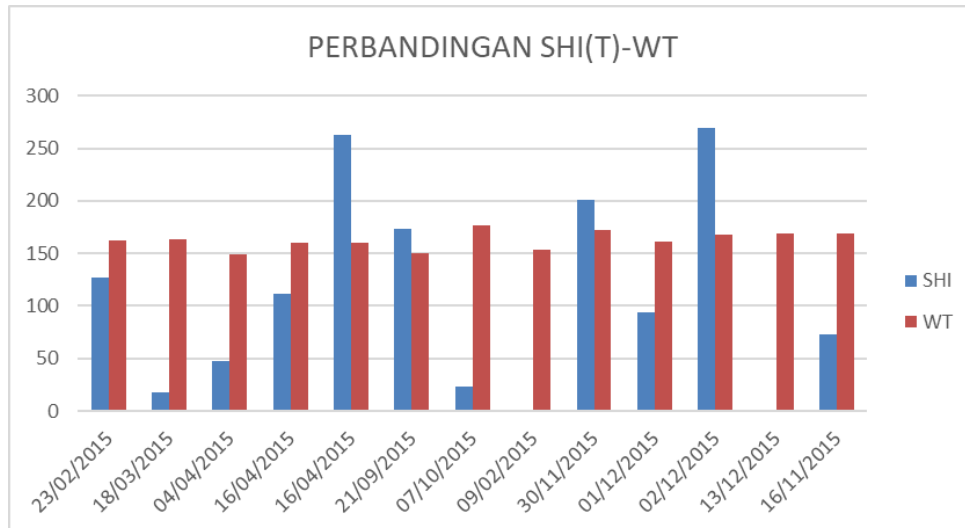
Gambar 1. Perbandingan nilai SHI(R) dengan SHI(T)



Gambar 2. Perbandingan nilai SHI(R) dengan WT

Nilai POSH pada Tabel 2 menunjukkan nilai lebih dari 0 % pada setiap kejadian kecuali pada kejadian hujan es di Bandung 7 Oktober 2015, Jakarta Utara 9 Februari 2015, dan Bogor 13 Desember 2015. Sedangkan nilai MEHS yang digunakan untuk memprediksi ukuran maksimum butiran es mempunyai rentang diameter 1-4 cm. Hasil perhitungan MEHS pada penelitian ini serupa dengan hasil penelitian Skripniková et al (2019) dimana nilai *maximum hail size* mencapai 4 cm.

Performa secara keseluruhan pada metode ini ditentukan melalui nilai POD, FAR, dan CSI. Perhitungan FAR dengan nilai 0.0 (0%) menunjukkan tidak ada hasil overestimate. Namun nilai POD 0.307 (30.7 %) pada SHI(T) dan 0.230 (23.0%) pada SHI(R) menunjukkan bahwa melalui metode ini peluang keberhasilan pendeteksian kejadian hujan es saat ketinggian puncak awan dihitung berdasarkan diagram termodinamika sebesar 30.7 % dan 23.0 % saat ketinggian puncak awan dihitung melalui hasil pengamatan radar cuaca. Nilai POD yang dihasilkan oleh SHI(T) lebih mendekati nilai WT dibandingkan SHI(R) karena ketinggian puncak awan yang terdeteksi pada radar relatif lebih rendah dari ketinggian puncak awan yang diperoleh melalui perhitungan diagram termodinamika dan mengakibatkan pengaruh pada hasil integrasi SHI. Secara keseluruhan, nilai POD tersebut tergolong rendah untuk performa metode SHI walaupun nilai FAR 0%.



Gambar 3. Perbandingan nilai SHI(T) dengan WT

Kemungkinan rendahnya nilai POD adalah pada perumusan nilai WT yang belum sesuai dengan karakteristik kondisi lokal di Indonesia. Perumusan WT oleh Witt (1998) didasarkan pada nilai *warning threshold* kejadian hujan es di lintang tinggi dengan nilai nilai CSI terbesar. Hasil simulasi rumusan tersebut menunjukkan perlunya perbaikan atau modifikasi yang disesuaikan dengan karakteristik lokal kejadian hujan es di Indonesia.

IV. KESIMPULAN

Simulasi metode SHI pada kejadian hujan es di Indonesia dilakukan pada 13 kejadian hujan es dan 30 data perbandingan. Hasil simulasi menunjukkan nilai yang berbeda antara SHIT dan SHIR dengan nilai SHIT yang lebih besar namun tidak terpaut jauh. Simulasi pada nilai SHIT lebih mendekati nilai WT dikarenakan ketinggian puncak awan yang ditentukan oleh diagram aeorologi lebih tinggi dari hasil interpretasi ketinggian puncak awan melalui radar cuaca. Ketika indikator kejadian hujan es yang didasarkan oleh metode SHI menggunakan rumusan WT standar, maka SHIT lebih bagus digunakan sebagai detektor dan prediktor kejadian hujan es di Indonesia. POSH dan Hasil perhitungan nilai MEHS dengan rentang diameter 1-4 cm perlu diverifikasi dengan data observasi.

Nilai FAR yang mencapai 0% menunjukkan metode ini mempunyai tingkat kesalahan yang sangat kecil untuk mendeteksi atau memperdiksi adanya huajan es. Namun nilai POD yang juga tergolong rendah, yaitu 30.7 % dan 23.0 % menunjukkan bahwa metode ini juga cukup sulit untuk mendeteksi eksistensi hail di lapangan. Simulasi metode SHI yang dilakukan terhadap data kejadian hujan es di Indonesia ini akan menghasilkan nilai POD dan CSI yang lebih besar ketika terdapat modifikasi rumusan WT yang disesuaikan dengan karakteristik lokal Indonesia. Terdapat beberapa kelemahan pada penelitian ini, salah satunya data radar cuaca yang digunakan belum menggunakan filter interferensi sehingga terdapat potensi misinterpretasi. Filter interferensi dapat dilakukan berdasarkan peneliian Ali et al (2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., 2014. Analisa Dinamika Atmosfer Fenomena Hujan Es di Jakarta (Studi kasus kejadian hujan es di Jakarta tanggal 22 April 2014). Jurnal Meteorologi dan Geofisika Edisi September 2014. BMKG, Jakarta
- Ali, A., Putra, R., M., 2015. Identifikasi Kejadian Hujan Es Menggunakan Radar Cuaca Doppler, Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer 2015, LAPAN : Bandung
- Ali, A., Adrianto, R., and Saepudin, M., 2019. Preliminary Study of Horizontal And Vertical Wind Profile Of Quasi-Linear Convective Utilizing Weather Radar Over Western Java Region, Indonesia. International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES), 15(2), 177-186.

- Ali, A., Deranadyan, G. and Umam, I.H., 2021. An Enhancement to The Quantitative Precipitation Estimation Using Radar-Gauge Merging. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 17(1), pp.65-74.
- Ali, A., Supriatna, S. and Sa'adah, U., 2021. Radar-Based Stochastic Precipitation Nowcasting Using The Short-Term Ensemble Prediction System (Steps)(Case Study: Pangkalan Bun Weather Radar). *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 18(1), pp.91-102.
- Ali, A., Umam, I. H., Leijnse, H., and Sa'adah, U., 2022. Preliminary Study Of A Radio Frequency Interference Filter For Non-Polarimetric C-Band Weather Radar In Indonesia (Case Study: Tangerang Weather Radar). *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 18(2), 189-202.
- Barry, R.G. and R.J. Chorley., 1998. *Atmosphere, Weather and Climate*, London: Seventh Edition, Routledge Ltd., hal. 409
- Brandes, E. A., Zrnica, D. S., Klazura, G. E., Suprenant, C. F., and Sirmans, D., 1991. The Next Generation Weather Radar (WSR-88D) as an applied research tool. In *Preprints, 25th Int. Conf. on Radar Meteorology*, Paris, France, Amer. Meteor. Soc (pp. 47-50).
- Byers, H.R., 1974. *General Meteorology*, Newyork: McGraw-Hill Book Company Inc. London
- Crum, T. D., and Alberty, R. L., 1993. The WSR-88D and the WSR-88D operational support facility. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(9), 1669-1688.
- Fadholi, A., 2012. Analisa Kondisi Atmosfer pada Kejadian Cuaca Ekstrem Hujan Es (Hail). *Simetri: Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*, 1(2).
- Federer, B., Waldvogel, A., Schmid, W., Schiesser, H. H., Hampel, F., Schweingruber, M., and Vento, D., 1986. Main results of Grossversuch IV. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 25(7), 917-957.
- Johnson, J. T., MacKeen, P. L., Witt, A., Mitchell, E. D. W., Stumpf, G. J., Eilts, M. D., and Thomas, K. W., 1998. The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Weather and forecasting*, 13(2), 263-276.
- Lemon, L. R., 1978. On the use of storm structure for hail identification. In *Conference on Radar Meteorology*, 18 th, Atlanta, Ga (pp. 203-206).
- Murillo, E. M., and Homeyer, C. R. (2019). Severe hail fall and hailstorm detection using remote sensing observations. *Journal of applied meteorology and climatology*, 58(5), 947-970.
- Rinehard, Ronald E., 2010. *Radar for Meteorologist fifth Edition*: Hal 146-160. Nevada Missouri.
- Sauvageot, Henri., 1991. *Radar Meteorology*. London : Artech House
- Skripniková, K., and Řezáčová, D., 2019. Comparison of radar-based hail detection using single-and dual-polarization. *Remote Sensing*, 11(12), 1436.
- Smart, J. R., and R. L. Alberty., 1985. The NEXRAD Hail Algorithm applied to Colorado thunderstorms. *Preprints, 14th Conf. on Severe Local Storms*, Indianapolis, IN, Amer. Meteor. Soc., 244-247.
- Tjasyono, B.H.K., 2004. *Klimatologi*. Institut Teknologi Bandung, Bandung
- Tjasyono, B.H.K., Harijono, Sri Woro B., 2006. *Meteorologi Indonesia 2 Awan and Hujan Monsun*. Institut Teknologi Bandung, Bandung
- Tjasyono, B.H.K., 2007 *Mikrofisika Awan dan Hujan*: Hal 150. Jakarta: Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Tuovinen, J. P., Hohti, H., and Schultz, D. M., 2020. Enlarging the severe hail database in Finland by using a radar-based hail detection algorithm and email surveys to limit underreporting and population biases. *Weather and Forecasting*, 35(2), 711-721.
- Waldvogel, A., Federer, B., and Grimm, P., 1979. Criteria for the detection of hail cells. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 18(12), 1521-1525.
- Waldvogel, A., Schmid, W., and Federer, B., 1978. The kinetic energy of hailfalls. Part I: Hailstone spectra. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 515-520.
- Waldvogel, A., B. Federer, W. Schmid, and J. F. Mezeix., 1978. The kinetic energy of hailfalls. Part II: Radar and hailpads. *J. Appl. Meteor.*, 17, 1680-1693.
- Wardoyo, Eko., 2012. *Pengantar III Modul Radar Cuaca*. Jakarta: BMKG.
- Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D. W., and Thomas, K. W., 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, 13(2), 286-303.